

腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断強度評価法の提案

長岡技術科学大学 学生員 ○奥山雄介, 正会員 宮下 剛, 長井正嗣
 高速道路総合技術研究所 正会員 若林 大
 川崎重工業 正会員 小出宜央
 新日鉄マテリアルズ 正会員 小林 朗, 秀熊佑哉
 倉敷紡績 正会員 堀本 歴

1. はじめに

近年の財政状況の悪化の中, 社会基盤構造物の維持管理や延命化の重要性が広く認識されている. 鋼構造物に目を向けると, 劣化要因の大半は腐食であり, 供用期間の経過とともに劣化の進行が避けられない. このような中で, 鋼構造物の補修・補強材料として炭素繊維強化プラスチック(以下, CFRP と記す)が注目されている. CFRP は軽量かつ高強度, 高弾性といった特徴を有しており, また, 耐候性, 防食性に対して優れた特性を持つため, 鋼構造物を延命化させる材料として期待されている.

CFRP を用いた補修・補強に関する既往の研究では, 断面欠損を生じた軸力・曲げ部材の断面修復を意図したものが多く. しかし, 実橋においては, 曲げ・せん断が作用する腹板の腐食が数多く報告されている. 特に桁端部の下フランジ近傍の腹板が腐食を受けているケースが多い. そこで, 著者らは, 桁端部腹板の腐食損傷を対象とした補修・補強工法の開発を進めている¹⁾.

本報では, CFRP を腹板に貼り付けた鋼桁のせん断強度について, Basler 式に準じた評価方法を提案する. ここでは, せん断弾性座屈強度の評価方法について, 二種類の方法を検討する. 一つ目は, 直交異方性板である CFRP と鋼板からなる積層板のせん断弾性座屈強度を厳密に計算する方法(以下, 厳密法)である. 二つ目は, 実務への適用を考え, CFRP が貼り付けられた腹板を鋼換算した合成断面としてせん断弾性座屈強度を簡易に計算する方法(以下, 簡易法)である. 両者の比較を通じて, 簡易手法の妥当性について検証した結果を報告する.

2. 弾性せん断座屈強度の評価方法

2.1 CFRP と鋼板から構成される場合 (厳密法)

ここでは, 図-1 に示すように, 一方向強化繊維を樹脂で硬化させた直交異方弾性板を鋼板に積層させた積層板を対象とする. そのため, 弾性座屈応力 τ_e は鋼板のみの場合とは異なり, 陽な形式が存在せず, 数値計算手法で求める必要がある. 図-2 に示すように四辺単純支持で純せん断を受ける問題を考える. 変形は面外方向のみに生じるものとし, 面外変位を w で表すと, 平面応力状態にある積層板のひずみエネルギー U は, まず単位面積あたりのひずみエネルギー

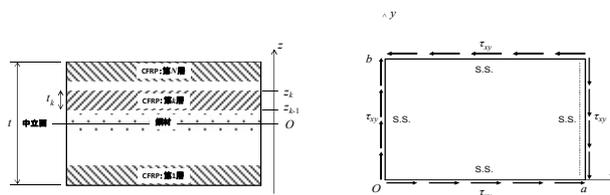


図-1 積層板の断面構成

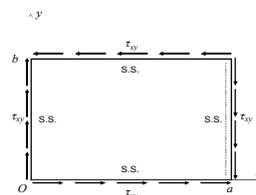


図-2 純せん断を受ける四辺単純支持された積層板

$$U = \frac{1}{2} \int_A \left[D_{xx} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_{yy} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_{ss} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + D_{xs} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + D_{ys} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dA \quad (1)$$

一を厚さ方向に積分して, 次いで対象領域で積分することにより, 式(1)のように導出される. ここで, x と y は空間座標, ∂ は空間座標に関する偏微分, A は積分領域を表す. また, $D_{xx}, D_{yy}, D_{xy}, D_{ss}, D_{xs}, D_{ys}$ は曲げ剛性であり, N は積層板の積層数, k は k 層目 ($k=1 \sim N$) を意味する.

次に, 純せん断 τ_{xy} による仕事は, 積層板の総厚を t とすると, 外力によるエネルギーは,

$$V = \tau_{xy} t \int_A \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dA \quad (2)$$

となる. さらに, Rayleigh-Ritz 法では, 積分領域と境界条件に応じて, 形状関数を次のように設定する.

$$w = A_{mn} X_m Y_n \quad (3)$$

ここで, X_m は x の関数, Y_n は y の関数であり, m と n は総和規約に従う.

以上, 式(1), 式(2), 式(3)から, 全ポテンシャルエネルギー最小の原理は, 次のように表される.

$$\frac{\partial}{\partial A_{mn}} (U - V) = 0 \quad (4)$$

式(4)から, 式(3)の A_{mn} に関する連立一次方程式が構成され, その固有値問題として, 弾性座屈応力 τ_e が求まることとなる. なお, 各層の物性値については, 鋼材, CFRP でそれぞれの物性値を用いるものとする.

2.2 CFRP と鋼板から構成される場合 (簡易法)

CFRP が貼り付けられた腹板を鋼換算した合成断面とし

てせん断弾性座屈強度を簡易に評価するため、鋼桁の弾性せん断座屈強度を算出する場合と同様の式を用いることとする。

$$\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_e & (\tau_e \leq 0.8\tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_e \cdot \tau_y} & (\tau_e > 0.8\tau_y) \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau_e = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu_s^2)} \left(\frac{t_{comp}}{h} \right)^2 \quad (6)$$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/\alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/\alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 E_s は鋼板の弾性係数、 ν_s は鋼板のポアソン比、 t_{comp} は鋼板とCFRPの合成板としての板厚、 α は腹板のアスペクト比(=幅 b /高さ h)を表す。

さらに、炭素繊維と樹脂からなるCFRPの材料特性を複合則を用いて算出する。ここで、CFRPは繊維軸方向と繊維軸直角方向で性質の異なる直交異方性板であるが、計算を簡単にするために、繊維軸方向の成分のみを用いる。よって、合成板としての板厚 t_{comp} は次のようになる。

$$t_{comp} = t_s + \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot t_{cf} \cdot n \quad (8)$$

ここで、 E_{cf} はCFRPの軸方向の弾性係数、 t_{cf} はCFRPの厚さ、 n はCFRPの積層数を示す。

3. Basler式に準じたせん断強度評価式

Basler式は、次のように表される。

$$\frac{Q_u}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (9)$$

ここで、 Q_u はせん断強度、 Q_y は降伏せん断強度、 τ_{cr} は弾性せん断座屈強度、 τ_y は降伏せん断応力(= $\sigma_y/\sqrt{3}$)、 σ_y は降伏応力である。右辺第1項が弾性座屈強度、第2項が後座屈強度を表わしている。

ここで、CFRPは鋼板の降伏まで引張応力に寄与すると考え、CFRPと鋼板のひずみが等しくなることに注意して、式(9)のBasler式を次のように変形する。

$$\frac{Q_u}{Q_y} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left(1 + \frac{E_L \bar{t}_c}{E_s t_s} \right) \quad (10)$$

ここで、 E_L :CFRPの弾性主方向の弾性係数、 \bar{t}_c :斜張力場に対して引張側となるCFRPの総厚(= $2t_c$)である。以下では、式(10)を用いて腹板をCFRP補強した鋼桁のせん断強度の評価を試みる。

4. 数値計算結果

計算結果を表-1に示す。表には、厳密法、簡易法それぞれの弾性せん断座屈強度とせん断強度を示す。また、妥当性を検証するため、実際に試験により得られた最大荷重も

表-1 厳密法と簡易法の計算結果

項目	無補修	炭素繊維シートの目付量			
		150g/m ²	300g/m ²		
τ_{cr}	厳密法	MPa	95	100	120
	簡易法	MPa	95	133	175
P_u	厳密法	kN	1,216	1,277	1,363
	簡易法	kN	1,216	1,353	1,471
	実験値	kN	1,182	1,255	1,328
	簡易法/厳密法		1.00	1.06	1.08
	簡易法/実験値		1.03	1.08	1.11
	厳密法/実験値		1.03	1.02	1.03

合わせて示している。

表-1より、簡易法と厳密法では、弾性せん断座屈強度 τ_{cr} に差が生じており、簡易法では厳密法に比べて大きく評価される結果となった。これは、厳密法では、繊維の配向角やCFRPの直交異方性を考慮しているのに対して、簡易法では、配向角や異方性を考慮できないこと、また、CFRPと鋼板からなる積層板の物性を鋼換算して求めるため、積層板としての総厚は小さくなるものの、CFRPのヤング率よりも大きな鋼板のヤング率を使用するため、弾性せん断座屈強度 τ_{cr} が大きくなることによる。

しかし、せん断強度の計算結果について見ると、実験値との誤差が厳密法では150g/m²目付の炭素繊維シートを用いた場合に2%、300g/m²目付の炭素繊維シートを用いた場合に3%であった。これに対し、簡易法では、150g/m²目付の炭素繊維シートを用いた場合に8%、300g/m²目付の炭素繊維シートを用いた場合に11%であった。この結果から、簡易法は厳密法に比べてやや危険側の評価となるが、適切な係数を乗じることによって、精度の向上を図ることが可能であると言える。

5. まとめ

本研究では、CFRPを腹板に貼り付けた鋼桁のせん断強度を評価する方法として、弾性せん断座屈強度の算出について、厳密法と簡易法の2種類の方法を検討した。以下に本研究から得られた知見を示す。

- 1) 厳密法と簡易法では、せん断座屈強度に誤差が生じる。これは、厳密法においてCFRPの繊維の配向角、直交異方性を考慮しているのに対し、簡易法ではこれらを考慮していないことによる。
- 2) せん断強度の評価結果をみると、厳密法では2%~3%、簡易法では8%~11%の誤差であった。簡易法に適切な係数を乗じることで、精度の向上を図ることが可能である。

参考文献

- 1) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP接着鋼板の一軸圧縮試験, 土木学会構造工学論文集, Vol.57A, pp735-746, 2011.